

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни**

«ДЖЕРЕЛА СВІТЛА»

*(для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2020**

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Джерела світла» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. Д. Гуракова, К. І. Суворова, Л. Г. Баландаєва. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 48 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Л. Д. Гуракова,
канд. техн. наук, доц. К. І. Суворова,
асист. Л. Г. Баландаєва

Рецензент

А. С. Литвиненко, кандидат технічних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерел світла Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла, протокол № 4 від 6 грудня 2018 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Дослідження електричних і світлотехнічних параметрів джерел світла різних типів.....	5
Лабораторна робота № 2. Дослідження параметрів галогенних ламп розжарення.....	11
Лабораторна робота № 3. Дослідження параметрів люмінесцентних ламп	16
Лабораторна робота №4. Дослідження біяелектродного падіння напруги і градієнта потенціалу в люмінесцентних лампах.....	22
Лабораторна робота № 5. Дослідження характеристик розрядних ламп високого тиску	27
Лабораторна робота № 6 Дослідження спектральних та колірних характеристик розрядних джерел світла.....	33
Лабораторна робота № 7 Дослідження характеристик світлодіодів ...	39
Список рекомендованої літератури.....	46
Додатки.....	

ВСТУП

Джерело світла (далі ДС) – основна частина освітлювальної або опромінювальної установки. Правильний вибір ДС та режиму його експлуатації є одним з найважливіших факторів, що забезпечують ефективність світлотехнічної установки в цілому. У зв'язку з цим теоретичний курс «Джерела світла» доповнюється лабораторними роботами, мета яких – практичне вивчення світлових, електричних і експлуатаційних характеристик різних типів ДС: розрядних ламп низького тиску (люмінесцентних) і високого тиску (ртутних і натрієвих; металогалогенних), світлодіодних та ламп розжарювання (включаючи галогенні).

Виконуючи лабораторну роботу, аналізуючи її результати при складанні звіту, та відповідаючи на контрольні запитання студент повинен користуватися цими методичними вказівками, конспектом лекцій та рекомендованою літературою.

Звіт з лабораторної роботи повинен складатися із таких частин:

- загальної частини (мета роботи, завдання дослідження, електричні схеми, об'єкт дослідження);
- результатів експериментальних досліджень (таблиці, графіки, рисунки);
- аналізу результатів досліджень з поясненням фізичної суті зміни параметрів;
- висновків.

Звіт виконують на аркушах формату А4, його підписує студент з вказівкою дати проведення досліджень і захисту роботи.

Лабораторна робота №1

Дослідження електричних і світлотехнічних параметрів джерел світла різних типів

Мета роботи – вивчення конструкції та принципу дії ламп розжарювання, компактних люмінесцентних ламп і світлодіодних ламп, визначення їх електричних і світлових параметрів та впливу напруги мережі на ці параметри.

Опис експериментальної установки

Для виміру світлових характеристик ламп використовують фотометричну кулю, а електричних – амперметр, який вимірює струм лампи $I_{\text{л}}$, а також вольтметр і ЛАТР, які дозволяють регулювати напругу $U_{\text{м}}$, гальванометр. Загальна схема установки наведена на рисунку 1.1.

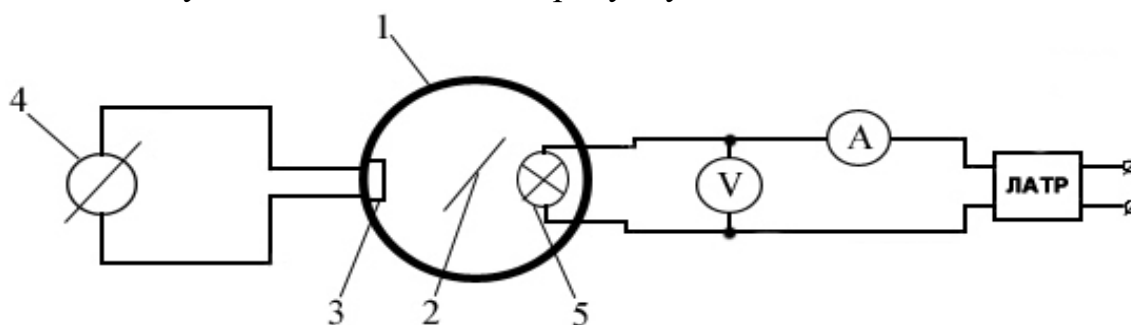


Рисунок 1.1 – Схема установки для дослідження параметрів ламп:

- 1 – фотометрична куля; 2 – екран; 3 – селеновий фотоелемент;
4 – гальванометр; 5 – досліджувана лампа

В роботі досліджуються освітлювальні лампи розжарювання (ЛР) потужністю 60 Вт з аргоновим і криптоновим наповненням, малогабаритна галогенна лампа (ГЛР) типу КГМ12-20, компактна люмінесцентна лампа (КЛЛ), світлодіодна лампа.

Завдання

1. Виміряти світловий потік досліджуваних ламп для номінальної напруги мережі.
2. Виміряти струм досліджуваних ламп при номінальній напрузі мережі $U_{\text{ном}}$.

3. Повторити вимір за п.1,2 при напрузі мережі $\pm 10\%$ від $U_{\text{ном}}$.
4. Розрахувати світлову віддачу досліджуваних ламп H при коливаннях $U_{\text{м}}$.
5. Розрахувати коефіцієнти нестабільності світлового потоку γ_{ϕ} і потужності лампи γ_p для всіх типів ламп.
6. Зробити висновки за отриманими результатами, порівняти одержані параметри різних типів джерел світла.

Загальні положення Лампи розжарювання

Теплові джерела світла, до яких відносяться лампи розжарювання, прості в експлуатації завдяки легкій заміні, відсутності часу розгоряння. Основний недолік цих ламп – низька світлова віддача.

ЛР уявляють собою скляну колбу, яка наповнена інертним газом (аргоном, криптоном, азотом чи їх сполуками). Усередині колби знаходиться вольфрамове тіло розжарення (ТР), яке здебільшого має спіральну або біспіральну форму. ТР закріплюється на скляній ніжці за допомогою гачків. Кінці нитки розжарення приварені до електродів, які введені в колбу через скляну лопатку. Вона щільно обтискає металеві вводи, що забезпечує їх нерухомість і герметичність лампи.

Через вводи по ТР проходить електричний струм, під впливом якого вона нагрівається до температури 2 500-3 000 К. У результаті виникає теплове випромінювання, спектр якого є суцільним і займає видиму й інфрачервону області оптичного діапазону довжини хвиль. Чим вища температура ТР, тим більший енергетичний потік лампи. Різним тілам з однаковою температурою притаманні різні щільність випромінювання і розподіл енергії за спектром. Випромінювання ЛР підкорюється загальним законам теплового випромінювання: законам Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна, Планка. Згідно з цими законами при зміні температури ТР значно змінюється спектр випромінювання. При цьому тільки при температурах 3 750-7 800 К максимум спектру випромінювання знаходиться у видимому діапазоні.

Чим більша частка випромінювання припадає на видиму частину спектру, тим вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) джерела випромінювання. Так, світловий ККД

$$\eta_{\text{св}} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} \varphi_{\text{е}}(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\text{е}}(\lambda, T)} = \frac{\Phi_1}{\Phi_{\text{е}}}, \quad (1.1)$$

де $\eta_{\text{св}}$ – світловий ККД; $V(\lambda)$ – відносна спектральна світлова ефективність випромінювання; Φ_1 – величина, еквівалентна світловому потоку лампи; $\Phi_{\text{е}}$ – загальний енергетичний потік лампи.

У сучасних ЛР, які мають температуру $T_{\text{Р}} = 3\,000\text{ К}$, світловий ККД дорівнює 2 – 3 %. Подальше підвищення температури стримується температурою плавлення вольфраму ($T_{\text{пл}} = 3\,653\text{ К}$). Таким чином економічність теплового джерела світла залежить від температури $T_{\text{Р}}$.

Для оцінки якості джерел світла використовують різні параметри, що всебічно характеризують їх властивості. Параметри розділяються на технічні й експлуатаційні. До технічних параметрів відносяться: електричні (струм, напруга, потужність лампи), світлові (світловий потік, сила світла, яскравість лампи) і конструктивні характеристики.

До експлуатаційних параметрів відносяться ефективність, надійність, економічність. Найбільш важливим показником надійності джерел світла є їх термін служби, яких для ЛР складає 1 000 – 2 000 год.

Ефективність ламп визначається світловою віддачою

$$H = \frac{\Phi}{P_{\text{л}}}, \quad (1.2)$$

де H – світлова віддача, Лм/Вт; Φ – світловий потік, Лм; $P_{\text{л}}$ – потужність лампи, Вт.

У сучасних ЛР світлова віддача лежить в межах 9 – 20 Лм/Вт. Збільшити світлову віддачу ламп можна за рахунок підвищення температури $T_{\text{Р}}$ та скорочення при цьому його розпилення. Це стало можливим за допомогою введення в лампу інертних газів: аргону, криптону, ксенону та їх сумішей, азоту.

Введення в лампу важких газів (криптону, ксенону), дозволяє підвищити світлову віддачу на 7 – 8 %. Криптонові й ксенонові лампи мають менші розміри колби при однаковій потужності в порівнянні з аргоновими завдяки нижчій теплопровідності газу. Чим вищий тиск, тим менша швидкість

розпилення ТР і тим більший термін служби ЛР. Звичайно тиск в ЛР встановлюють порядку 0,08 МПа (600 мм рт.ст.).

Особливістю експлуатації ЛР є значна залежність їх параметрів від величини напруги мережі U_M . Дану залежність можна описати за допомогою наступного рівняння

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{U_{M_1}}{U_{M_2}} \right)^{\gamma_A}, \quad (1.3)$$

де A_1, A_2 – будь-який параметр лампи при напрузі мережі U_{M_1} і U_{M_2} відповідно; γ_A – коефіцієнт нестабільності А.

При зміні напруги мережі на 1 % світловий потік змінюється на 3,5 %, світлова віддача – 2,0 %, термін служби лампи – 1,3 %. (для ЛР).

Компактні люмінесцентні лампи

Найсуттєвішим недоліком ЛР є низька енергоекономічність і строк служби. У теперішній час замість ЛР все частіше використовують компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) і світлодіодні (СД) джерела світла.

КЛЛ призначені для заміни ЛР, які планується поступово виводити з освітлювання. Конструктивно КЛЛ виготовляються у вигляді скляної розрядної трубки ($d = 9-15$ мм), у якій відбувається дуговий розряд низького тиску. В залежності від потужності, напруги мережі довжина розрядної трубки КЛЛ може бути достатньо великою. Для наближення до розмірів ЛР її багаторазово згинають або звивають у спіраль. Таким чином утворюються двоканальні, чотирьохканальні, шестиканальні КЛЛ тощо.

КЛЛ мають світлову віддачу до $75 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$, індекс кольоропередачі $R_a \geq 80$, строк служби 8–15 тис. год., кольорову температуру $T_{\text{кол}} \approx 2700\text{--}6000$ К. Параметри КЛЛ залежать від коливань напруги мережі, але в меншій ступені ніж параметри ЛР. Ця залежність описується формулою 1.3, але значення коефіцієнтів нестабільності γ_A відрізняються від аналогічних значень для ЛР.

Світловипромінюючі діоди

Генерація світла у СД відбувається за рахунок енергії, що виділяється при рекомбінації носіїв струму – електронів та дірок – на межі напівпровідникових

матеріалів з різним типом провідності. Типова конструкція найбільш масових СД показана на рисунку 1.2.

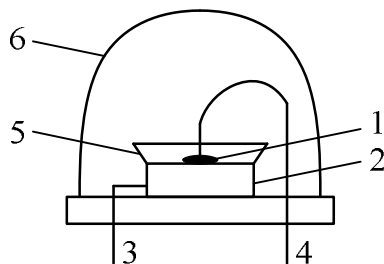


Рисунок 1.2 – Типова конструкція СД:

1 – випромінюючий кристал ; 2 – кристалотримач; 3,4 – електроди;
5 – відбивач; 6 – корпус СД

Світлова віддача СД джерел світла $50 - 100 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$, строк служби до 100 000 год., індекс кольоропередачі до 85, кольорова температура $T_{\text{кол}} = 3\,000 - 8\,000 \text{ К}$.

При зазначених параметрах за СД майбутнє джерел світла. Вони розвиваються дуже стрімко. Детальніша характеристика СД наведена нижче (див. лабораторну роботу № 7).

Рекомендації до виконання роботи

1. Вимір світлового потоку ламп здійснюють у фотометричній кулі (рис. 1.1). Для цього необхідно попередньо проградувати гальванометр 4 за допомогою еталонної лампи світлового потоку з фіксацією отриманого значення струму гальванометра – $i_{\text{ет}}$. Після заміни еталонної лампи на досліджувану, слід зафіксувати нове значення фотоструму – $i_{\text{досл}}$. Світловий потік досліджуваної лампи $\Phi_{\text{досл}}$ визначається співвідношенням

$$\Phi_{\text{досл}} = \Phi_{\text{ет}} \cdot \frac{i_{\text{досл}}}{i_{\text{ет}}}, \quad (1.4)$$

де $\Phi_{\text{ет}}$ – світловий потік еталонної лампи.

2. Заміри струму лампи виконують за допомогою амперметра згідно наведеної вище схеми (рис. 1.1).

3. Зміну напруги мережі здійснюють за допомогою ЛАТРа і фіксують вольтметром. Заміна напруги, що подається на галогенну лампу, здійснюється за допомогою тумблера на блоці живлення. Категорично забороняється

подавати на лампу напругу більше 13 В. Тумблер струму на БЖ повинен знаходитися у положенні 2,6 А.

4. Світлову віддачу досліджуваних ламп визначають за виразом (1.2).

5. Виконати аналіз параметрів всіх типів ламп і оцінити вплив напруги мережі на характеристики ламп. На підставі отриманих результатів побудувати залежності $H = f(U_M)$ і $P = f(U_M)$. Значення параметрів наводять у відсотках, прийнявши кожний з параметрів за 100 % при $U_M = 220$ В.

6. Результати заносять в таблицю 1.1., 1.2.

7. Провести розрахунок коефіцієнтів нестабільності для кожного типу ламп згідно з виразом (1.3), отримані результати занести в таблицю 1.3.

Таблиця 1.1 – Характеристики досліджуваних ламп

Тип джерел світла	I, A	$P, Вт$	$i_{досл}, \text{поділки}$	$\Phi, \text{Лм}$	$H, \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$
-------------------	--------	---------	----------------------------	-------------------	----------------------------------

Таблиця 1.2 – Залежність параметрів ламп від коливання напруги мережі

Тип ДС	$U_{ном}, В$					$U_{ном} - 0,1U_{ном}, В$					$U_{ном} + 0,1U_{ном}, В$				
	I, A	$P, Вт$	$i_{досл}, \text{под}$	$\Phi, \text{Лм}$	$H, \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$	I, A	$P, Вт$	$i_{досл}, \text{под}$	$\Phi, \text{Лм}$	$H, \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$	I, A	$P, Вт$	$i_{досл}, \text{под}$	$\Phi, \text{Лм}$	$H, \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$

Таблиця 1.3 – Коефіцієнти нестабільності

Тип лампи	γ_Φ	γ_H	γ_P	γ_I
-----------	---------------	------------	------------	------------

Контрольні запитання

1. Побудова та принцип дії ЛР, КЛЛ, галогенних ламп, світлодіодних ламп.
2. Конструкція тіла розжарювання. Переваги спірального і біспірального ТР.
3. Роль та види інертних газів, які використовуються в ЛР.

4. Особливості спектру ЛР, КЛЛ, світлодіодів.
5. Енергетичний $\eta_{\text{ен}}$, ефективний $\eta_{\text{еф}}$, світловий $\eta_{\text{св}}$ ККД та їх значення для ЛР.
6. Технічні й експлуатаційні параметри джерел світла.
7. За рахунок чого підвищується світлова віддача криптонових ламп у порівнянні з аргоновими?
8. Шляхи зменшення теплових втрат в газі, що наповнює лампу.
9. Переваги й недоліки ЛР в порівнянні з розрядними джерелами світла.
10. Світлова віддача та світловий ККД ламп ЛР.
11. Конструкція і параметри КЛЛ.
12. Конструкція і параметри СД.

Лабораторна робота № 2

Дослідження параметрів галогенних ламп розжарювання

Мета роботи: визначення електричних і світлових параметрів малогабаритної галогенної лампи розжарювання, дослідження розподілу температури уздовж тіла розжарювання та розрахунок коефіцієнта охолоджуючої дії електродів.

Опис експериментальної установки

У роботі використовується малогабаритна галогенна лампа розжарювання (ГЛР) типу КГМ12-20.

Для вимірювання світлових характеристик лампи використовують фотометричну кулю, а електричних – амперметр, що вимірює струм лампи $I_{\text{л}}$, а також вольтметр для замірів $U_{\text{л}}$ і блок живлення (БЖ), який дозволяє регулювати напругу на лампі. Загальна схема установки наведена на рисунку 2.1.

Дослідження розподілу температури уздовж тіла розжарювання здійснюють за допомогою оптичного пірометра типу ЛОП-72.

Регулювання напруги живлення лампи проводять з використанням блоку живлення типу Б5-47.

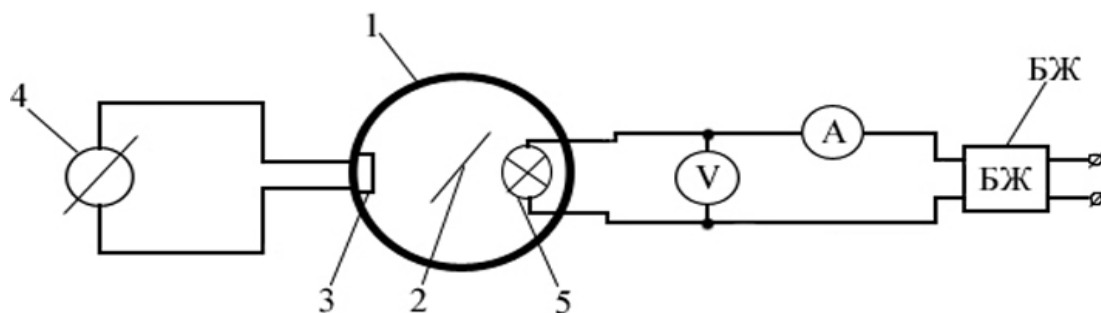


Рисунок 2.1 – Схема установки для дослідження параметрів ГЛР:

1 – фотометрична куля; 2 – екран; 3 – селеновий фотоелемент;
4 – гальванометр; 5 – досліджувана лампа; БЖ – блок живлення лампи

Завдання

1. Виміряти світловий потік і електричні параметри лампи ГЛР при номінальній напрузі живлення $U_{\text{ном}} = 12 \text{ В}$.
2. Повторити вимір за п. 1 при напрузі живлення 11 і 13 В.
3. Розрахувати світлову віддачу лампи і побудувати графічну залежність $H = f(U_{\text{ж}})$.
4. Виміряти температуру T в різних точках тіла розжарювання при $U_{\text{ж}} = 11, 12, 13 \text{ В}$.
5. Побудувати графік розподілу температури T за довжиною тіла розжарювання l і розрахувати коефіцієнт охолоджуючої дії електродів $\alpha_{\text{ел}}$.

Загальні положення

У вакуумних лампах вольфрам безперешкодно випаровується з тіла розжарювання (ТР) і осідає на внутрішніх стінках колби, що призводить до різкого зниження світлового потоку. Одним з шляхів протидії швидкого випаровування вольфраму є наповнення ламп інертними газами. Але цей шлях не усуває осідання вольфраму на колбі, а тільки зменшує швидкість цього процесу.

Для повного очищення колби лампи від осідаючих частинок вольфраму до інертного газу додають галогени (йод, хлор, бром, фтор та їх сполуки). Завдяки цим добавкам у лампі при певних умовах виникає ланцюг реакцій, що називається галогенним циклом. Ці реакції приводять до повного очищення колби від осідаючого вольфраму і повертають його назад до ТР.

Галогенні лампи розжарювання (ГЛР) є тепловими джерелами світла, де створені умови для протікання реакцій вольфрамо-галогенного циклу (ВГЦ).

ВГЦ – це комплекс реакцій, в результаті яких частинки вольфраму, що випарилися з поверхні нагрітого до високих температур ТР, переміщуються за допомогою галогенів у зворотному напрямку – з області більш низьких в область більш високих температур. Призначення цих циклів - запобігати почорнінню колби частинками вольфраму, який випаровується з ТР, зберігати її прозорою протягом усього терміну служби лампи. На жаль, ВГЦ, який повертає вольфрам на ТР, не здатний «регенерувати» його, так як частинки вольфраму випаровуються з одних ділянок ТР (більш гарячих), а осідають на інших (більш холодних).

ВГЦ проходить за однаковою схемою



де X – галоген; n – кількість атомів.

При низькій температурі (300 °C – 1 200 °C) галоген з'єднується на стінках колби з частинами вольфраму і створює хімічне сполучення галогенід-вольфраму. При певних температурах це газоподібне сполучення дифундує від стінок колби (де його концентрація підвищена) в напрямку ТР. Тут галогеніди дисоціюють на вольфрам, що осідає на ТР, і галоген, який у вільному стані рухається до стінки колби для з'єднання з новою порцією вольфраму.

Спрощене уявлення про ВГЦ відображено на рисунку 2.2.

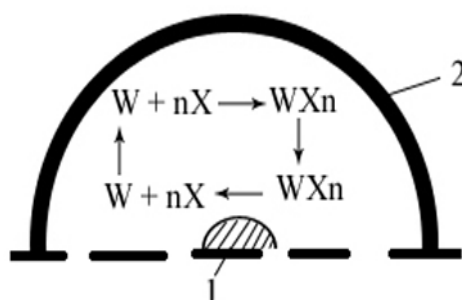


Рисунок 2.2 – Схема проходження ВГЦ:
1 – тіло розжарювання; 2 – оболонка лампи

Протікання ВГЦ посилюється при переході від йода до броду, потім до хлору і фтору. При цьому підвищується температура дисоціації галогенідів. Причому тільки при фторному циклі галогеніди розпадаються на самому ТР, а при використанні інших (йоду, броду, хлору) цей розпад починається при

більш низьких температурах (нижче температури ТР) і вольфрам осідає не на ТР, а на прилеглі області.

Для нормального ВГЦ дуже важливою є оптимальна концентрація галогену. Вона повинна бути достатньою, щоб цикл не зупинився, і не дуже високою, щоб не призвести до руйнування металевих деталей лампи. Так, при використанні йоду необхідне таке дозування: 0,01 – 1 мк моль на 1 см³ об'єму лампи. У сучасних ЛР застосовують, як правило, не чисті галогени (які є дуже агресивними речовинами), а їх сполуки, наприклад, бромистий метил CH_2Br_2 і бромистий метилен CH_3Br .

Для наповнення ГЛР використовують криптон, ксенон при тиску вище 10⁵ Па у холодному стані, тобто в робочому стані при високих температурах ТР тиск інертного газу значно вищий за атмосферний. Цей факт сприяє підвищенню терміну служби ГЛР до 2 000 год.

Оскільки для нормального протікання ВГЦ необхідні високі температури, то колбу ЛР виготовляють з тугоплавкого кварцового скла з температурою плавлення 1 986 К. Цим пояснюється можливість зменшення габаритних розмірів ГЛР.

Застосування кварцового скла та зниження розпилення вольфрамового ТР дали можливість підвищити його температуру і, як наслідок, сприяють зростанню світлової віддачі лампи, що складає $20\text{--}30 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$. Вони також мають підвищені яскравість, термін служби, малі габаритні розміри й постійні характеристики у процесі роботи.

ГЛР застосовують для інфрачервоного опромінення, у прожекторах і світильниках зовнішнього й внутрішнього освітлення, для фотознімального й телевізійного освітлення, в автомобільних фарах, аеродромних вогнях, а також оптичних приладах.

Рекомендації до виконання роботи

1. Методика виміру світлового потоку, світлової віддачі та електричних характеристик наведена в лабораторній роботі № 1.

2. Заміна напруги, що подається на лампу, здійснюється за допомогою тумблера на блоці живлення. Категорично забороняється подавати на лампу напругу більше 13 В. Тумблер струму на БЖ повинен знаходитися у положенні 2,6 А.

3. Визначення температури тіла розжарювання проводять за допомогою оптичного пірометра і графіка $T = f(i_{nir})$, що знаходиться на лабораторному

столі. За результатами цих досліджень розраховують коефіцієнт охолоджуючої дії електродів $\alpha_{\text{ел}}$ як відношення площин $\frac{A_2}{A_1}$ (рис. 2.3).

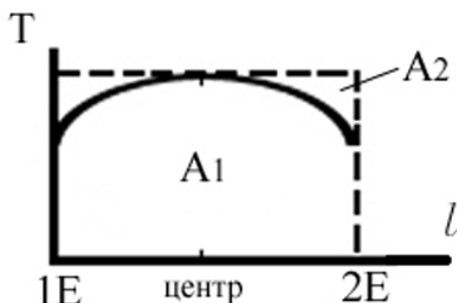


Рисунок 2.3 – Розподіл температури за довжиною тіла розжарювання l

Результати замірів занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати замірів характеристик лампи

№ з/п	$U_{\text{ж}}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$i_{\text{гальв.}}, \text{мкА}$	$\Phi, \text{Лм}$	$H, \text{Лм/Вт}$	$T(\text{К})$			$\alpha_{\text{ел}}$
							1ел	Центр	2ел	
1	11									
2	12									
3	13									

Контрольні запитання

1. Що таке вольфрамо-галогенний цикл? Який механізм і умови його протікання?
2. Які типи галогенів використовують в ГЛР, як вони впливають на характеристики лампи?
3. Які причини підвищення терміну служби і світлової віддачі ГЛР?
4. Конструкція галогенної ЛР.
5. Порівняйте характеристики ГЛР і звичайних ЛР.
6. До якого типу джерел світла відносяться ГЛР?
7. Охарактеризуйте якісний і кількісний склад газового наповнення ГЛР і звичайних ЛР.
8. Области застосування ГРЛ.

Лабораторна робота №3

Дослідження параметрів люмінесцентних ламп

Мета роботи: дослідження впливу величини розрядного струму люмінесцентних ламп на їх світлову віддачу, визначення частки випромінювання люмінофору в загальному світловому потоці лампи, визначення впливу напруги мережі на параметри люмінесцентних ламп (ЛЛ) і порівняльний аналіз їх різних типів.

Опис експериментальної установки

Для виміру світлових і електричних характеристик ЛЛ використовують фотометричний циліндр 7, електрична схема якого включає: досліджувану лампу 6; ЛАТР 1, для регулювання напруги мережі U_M ; вольтметр 2, що вимірює U_M , і 5, для замірів напруги на лампі U_L ; амперметр 3, що вимірює струм лампи I_L ; дросель 4, за допомогою якого регулюється I_L , ватметр для виміру потужності лампи P_L ; екран фотометричного циліндру 8; селеновий фотоелемент 9 і гальванометр 10 для заміру фотоструму селенового фотоелемента, показання якого пропорційні світловому потоку лампи Φ_L . Схема установки наведена на рисунку 3.1.

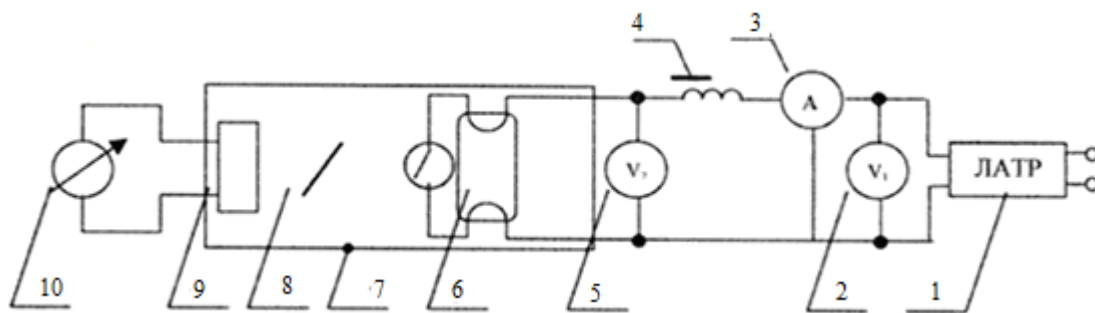


Рисунок 3.1 – Схема установки для дослідження параметрів ЛЛ:

- 1 – ЛАТР; 2 – вольтметр V_1 для заміру U мережі; 3 – амперметр для заміру I_L ;
- 4 – дросель; 5 – вольтметр V_2 для заміру U_L ; 6 – досліджувана лампа;
- 7 – фотометричний циліндр; 8 – екран; 9 – приймач випромінювання;
- 10 – гальванометр

Завдання

1. Виміряти світлові ($\Phi_{\text{л}}, H_{\text{л}}$) й електричні ($U_{\text{л}}, P_{\text{л}}$) характеристики ЛЛ залежно від величини розрядного струму ($I_{\text{л}}$). Заміри провести для двох типів ЛЛ різних потужностей.

2. За даними п.1 побудувати для кожної лампи графічні залежності $H_{\text{л}} = f(I_{\text{л}})$, $\Phi_{\text{л}} = f(I_{\text{л}})$, $P_{\text{л}} = f(I_{\text{л}})$, $U_{\text{л}} = f(I_{\text{л}})$.

3. Виміряти значення $I_{\text{л}}, P_{\text{л}}, \Phi_{\text{л}}, H_{\text{л}}, U_{\text{л}}$ для ЛЛ потужністю 20 Вт при номінальній напрузі мережі $U_{\text{м ном}} = 127$ В та при її відхиленнях у межах $\pm 10\%$ від $U_{\text{м ном}}$.

4. За даними п.3 розрахувати коефіцієнти нестабільності $\gamma_{\text{I}}, \gamma_{\text{P}}, \gamma_{\text{H}}, \gamma_{\text{Ф}}$.

5. Визначити частку випромінювання люмінофора в загальному світловому потоці ЛЛ.

Загальні положення

Люмінесцентні лампи (ЛЛ) – це ртутні лампи низького тиску. Конструктивно ЛЛ являє собою скляну трубку з впаяними в її кінці електродами (біспіральними чи триспиральними). Внутрішня поверхня колби покрита шаром люмінофору. В лампу введена ртуть, тиск парів якої складає 10^{-3} мм рт. ст. (лампа працює в насичених парах ртуті), інертний газ (аргон, криптон, ксенон, неон та їх суміші). Тиск інертного газу 2–4 мм рт.ст. Конструкція лампи наведена на рисунку 3.2.

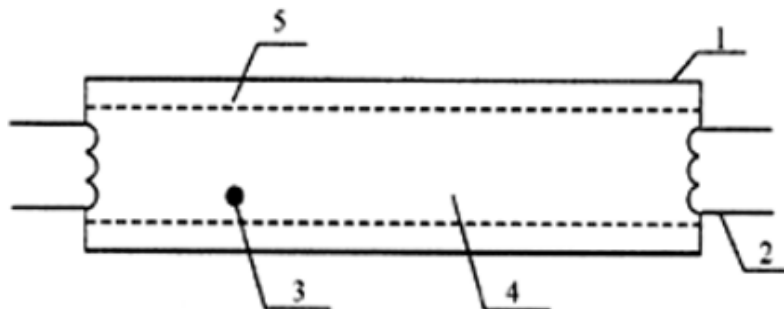


Рисунок 3.2 – Конструкція ЛЛ:

1 – колба лампи; 2 – електрод; 3 – крапля ртуті; 4 – інертний газ; 5 – люмінофор

Основне призначення інертного газу полягає у зменшенні розпилення електродів при роботі лампи і в полегшенні запалювання розряду.

Після запалювання в лампі виникає дуговий розряд низького тиску в парах ртуті та інертного газу. Внаслідок більш низьких потенціалів збуджування та іонізації ртуті порівняно з інертним газом іонізуються і випромінюють практично тільки атоми ртуті. Виняток складають прикатодні області лампи, де за рахунок наявності швидких електронів поряд зі світінням ртуті виникає також світіння та іонізація інертного газу.

Ртутний розряд низького тиску є ефективним джерелом резонансного випромінювання, яке лежить в УФ – частині спектру (лінії з довжинами хвиль 254 нм та 185 нм). Випромінювання видимих ліній незначне і світлова віддача розряду складає не більше $5-7 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$. Світлова віддача ЛЛ підвищується до

$85-90 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$ завдяки шару люмінофора на стінках колби. Він поглинає УФ– випромінювання ртутного розряду і перетворює його в смугу видимого випромінювання, що виходить з лампи. Таким чином, спектр випромінювання ЛЛ складається з випромінювання люмінофора, на яке накладається лінійчатий спектр ртутного розряду. Домінуючу частину потоку випромінювання лампи складає випромінювання люмінофора. Роль ртутного розряду зводиться до генерації УФ– випромінювання, яке збуджує світіння люмінофору. Використання різних люмінофорів і їх сумішей дає можливість отримати випромінювання практично будь-якого спектрального складу.

Строк служби сучасних ЛЛ складає 10–15 тис. годин. Він залежить від умов розряду, роду і тиску інертного газу, сили струму лампи, розмірів колби і приелектродних явищ, конструкції і технології виготовлення електродів, умов експлуатації лампи і технології її виготовлення.

З ростом напруги мережі строк служби ЛЛ падає, але значно менше, ніж для ламп розжарювання. У той же час зростають світлові й електричні параметри. Залежність параметрів ЛЛ від напруги мережі визначають за виразом (1.3) лабораторної роботи № 1.

Ця залежність для ЛЛ значно нижча ніж для ЛР, оскільки ЛЛ працюють у схемах з ПРА і коливання напруги мережі поділяються між лампою і ПРА.

Вихід резонансного випромінювання ЛЛ, тобто потік резонансного випромінювання, описується наступним виразом

$$\Phi_{\text{рез}} = C \cdot n_o \cdot n_e \cdot q_{01\text{max}} \cdot e^{\frac{-eV_{01}}{kT_e}}, \quad (3.1)$$

де $\Phi_{\text{рез}}$ – потік резонансного випромінювання; n_o – концентрація нейтральних атомів; n_e – концентрація електронів; $q_{01\text{max}}$ – максимальне значення ефективного перерізу атома; V_{01} – енергія часток; k – константа Больцмана; T_e – електронна температура, К; C – константа.

Аналіз виразу 3.1 дає відповідь на питання залежності світлових параметрів ЛЛ від струму розряду I_d . Наприклад, залежність світлової віддачі лампи H від I_d описується графічно на рис.3.3.

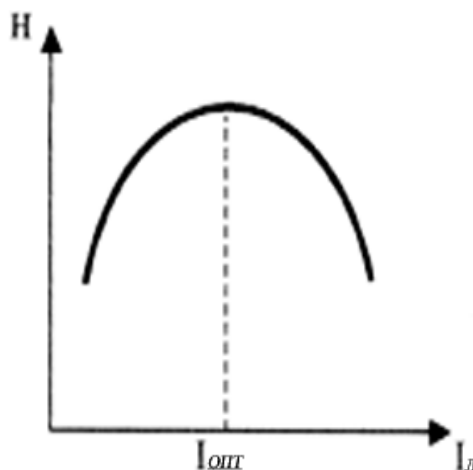


Рисунок 3.3 – Залежність світлової віддачі від струму лампи

Світлові параметри ЛЛ залежать від температури колби, оскільки лампа працює в насичених парах ртуті і її тиск залежить від температури.

Рекомендації до виконання роботи

1. Перед початком вимірювань проградувати гальванометр за еталоном світлового потоку.

2. Для запалювання лампи і вимірювання її електричних і світлових параметрів встановити досліджувану лампу в лампотримач. Включити дросель в гніздо «65 Вт», коли досліджується лампа потужністю 40 Вт, і в гніздо «20 Вт», коли досліджується лампа на 20 Вт. Включити тумблери «Сеть» і «Замер напруги», за допомогою ЛАТРа встановити необхідну напругу мережі: для 40 Вт ламп $U_M = 220$ В, для 20 Вт – $U_M = 127$ В. Запалювання лампи здійснити за допомогою тумблера «Зажигание».

3. Зміну струму лампи здійснюють за допомогою додаткової індуктивності у межах від 0,1 А до 0,55 А з інтервалом 0,05 А.

4. Методика виміру світлового потоку лампи викладена в лабораторній роботі № 1.

5. Для визначення частки випромінювання люмінофору у загальному випромінюванні лампи (m) виміряти світловий потік двох ламп однакової потужності, в одній з яких відсутній люмінофор, і розрахувати згідно виразу:

$$m = \frac{\Phi_{\text{люм}} - \Phi_{\text{без люм}}}{\Phi_{\text{люм}}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де $\Phi_{\text{люм}}$ – світловий потік лампи з люмінофором; $\Phi_{\text{без люм}}$ – світловий потік лампи без люмінофору.

6. При вимірюванні залежності параметрів лампи від напруги мережі зміну напруги здійснюють ЛАТРом у межах $\pm 10\%$ від $U_{\text{м ном}}$. Коефіцієнти нестабільності $\gamma_I, \gamma_P, \gamma_H, \gamma_\phi, \gamma_U$ розраховують, користуючись виразом 1.3.

7. Результати досліджень звести в табл. 3.1 і 3.2.

Контрольні запитання

1. Опишіть конструкцію ЛЛ низького тиску.
2. Роль люмінофору в ЛЛ.
3. Роль інертного газу в ЛЛ.
4. Який вид розряду існує в ЛЛ?
5. Яку роль відіграє ртуть в ЛЛ?
6. Що таке резонансне випромінювання?
7. Пояснити залежність параметрів ЛЛ від розрядного струму $I_{\text{д}}$.
8. Як і чому впливає температура колби на параметри ламп?
9. Порівняйте вплив напруги мережі на параметри ЛЛ і ламп розжарювання.
10. Поясніть механізм виникнення розряду в ЛЛ.
11. Які параметри мають сучасні ЛЛ?
12. Особливості роботи ЛЛ.
13. Як впливає температура колби на характеристики ЛЛ.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження параметрів кожної ЛЛ

$I_{\text{л}}, \text{А}$	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
$U_{\text{л}}, \text{В}$										
$P_{\text{л}}, \text{Вт}$										
$I_{\text{гальв.}}, \text{мкА}$										
$\Phi, \text{Лм}$										
$H, \text{Лм/Вт}$										

Таблиця 3.2 – Результати дослідження впливу напруги мережі на параметри 20 Вт ЛЛ

$U_{\text{м}}, \text{В}$	114	127	140	γ_{I}	γ_{p}	γ_{U}	γ_{Φ}	γ_{H}
$I_{\text{л}}, \text{А}$								
$P_{\text{л}}, \text{Вт}$								
$U_{\text{л}}, \text{В}$								
$\Phi, \text{Лм}$								
$H, \text{Лм/Вт}$								

Лабораторна робота № 4

Дослідження біляелектродного падіння напруги і градієнта потенціалу в люмінесцентних лампах

Мета роботи: отримання навиків вимірювання біляелектродного падіння потенціалу U_{AK} та градієнту потенціалу E і вивчення їх залежності від параметрів люмінесцентних ламп (ЛЛ).

Опис експериментальної установки

У роботі використовується установка, електрична схема якої наведена на рис 4.1.

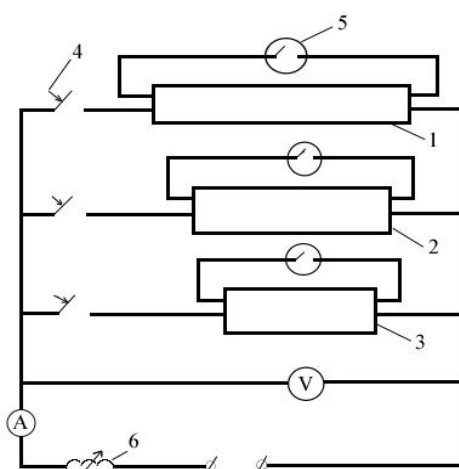


Рисунок 4.1 – Схема установки для вимірювання анодно-катодного падіння потенціалу в люмінесцентних лампах

На лабораторному столі знаходяться три ЛЛ різної довжини. Кожна лампа вмикається своїм тумблером 4. При подачі напруги U за допомогою стартера 5. Регулювання розрядного струму лампи здійснюють за допомогою опору 6 і вимірюється амперметром А. Напругу на лампі вимірюють за допомогою вольтметра V. На лабораторному столі знаходиться тубус-фотометр, за допомогою якого вимірюють розподіл яскравості уздовж лампи.

Завдання

1. Заміряти напругу на лампах різної довжини при різних розрядних струмах ($I_p = 0,1 \text{ A}; 0,2 \text{ A}; 0,3 \text{ A}; 0,4 \text{ A}; 0,5 \text{ A}$).

2. Побудувати залежності напруги на лампі від відстані між електродами $U_{\text{Л}} = f(l_{\text{ел}})$ для ламп різної довжини і залежність анодно-катодного падіння потенціалу U_{AK} від розрядного струму I_p , тобто $U_{AK} = f(I_p)$.

3. За даними п. 1, 2 визначити градієнт потенціалу E і побудувати залежність від розрядного струму $E = f(I_p)$.

4. Використовуючи тубус-фотометр виміряти (у відносних одиницях) розподіл яскравості за довжиною лампи, побудувати залежність $L = f(l_{\text{л}})$ і визначити коефіцієнт зниження яскравості K_L .

Загальні положення

Біляелектродні процеси в ЛЛ відіграють важливу роль в реалізації різних режимів роботи оксидних катодів, що визначають строк служби ламп. Як відомо, в ЛЛ використовуються оксидні катоди, перевагою яких є низька робота виходу (1,2 – 1,3 еВ).

У зв'язку з цим числові значення катодного (U_K) і анодного (U_A) падіння потенціалів і характер їх зміни залежно від різних факторів мають велике значення для розробки і конструювання електродів ЛЛ. Особливістю дугового розряду в ЛЛ є його стягування на катоді в так звану «катодну пляму» (КП). Таким чином у робочому режимі емісія проходить не з усієї поверхні катоду, а з його невеликої ділянки (0,01 – 0,05 см^2), що має підвищену температуру (1 200 – 1 300К). Розігрів зони КП здійснюється за рахунок:

- бомбардування позитивними іонами, що виникають в результаті іонізації атомів ртуті у прикатодній області розряду. Швидкість іонізації залежить від катодного падіння потенціалу (U_K). При аргоновому наповненні лампи і добре активованих катодах $U_K = 11 - 12$ В. Зниження емісійної здатності покриття катодів і перехід до більш легких газів призводять до зростання U_K ;

- бомбардування зони КП електронами в анодний півперіод при роботі лампи на змінній напрузі. Інтенсивність нагріву визначається величиною анодного падіння (U_A).

Роздільне вимірювання U_K і U_A в лампі є досить складним. Але експериментально можна встановити, сумарне їх значення (U_{AK}). У цій лабораторній роботі U_{AK} визначається через вимірювання напруги на лампах з різною відстанню між електродом ($l_{\text{ел}}$) і побудовою залежності $U_{\text{л}} = f(l_{\text{ел}})$. Для ЛЛ з дуговим розрядом U_{AK} звичайно складає 12 – 20 В залежно від струму, типу катодів та інших умов. У ЛЛ стандартного типу катодне падіння потенціалу складає 10 – 15 В, а анодне – 3 – 6 В. Катодне падіння зростає із зменшенням молекулярної маси наповнюючого газу і його тиску (рис. 4.2).

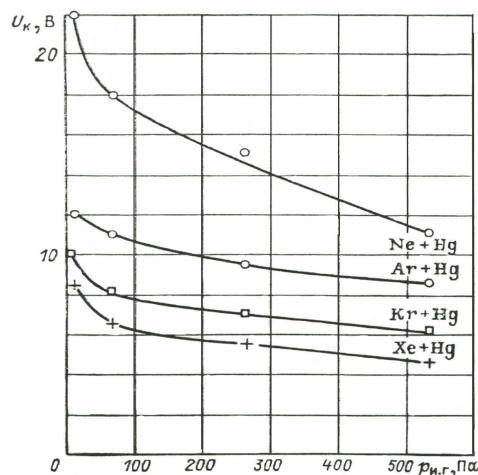


Рисунок 4.2 – Залежність катодного падіння потенціалу U_K від роду і тиску наповнюючого газу $P_{гг}$

Катодне падіння потенціалу залежить від конструкції катоду і його емісійних властивостей, а також від сили струму. З ростом струму катодне падіння дещо зменшується, але до тих пір, поки I_p менший, або дорівнює струму емісії I_e . Коли I_p стає більшим ніж I_e , U_K знову збільшується.

Основною частиною дугового розряду, що дає найбільшу частку резонансного випромінювання, є позитивний стовп розряду. Він складається з електронів, іонів і нейтральних атомів, які визначають всі елементарні процеси в розряді.

Однією з основних характеристик позитивного стовпу розряду є градієнт потенціалу E , що визначається формулою

$$E = \frac{dU_{ст}}{dl_{ст}}, \quad (4.1)$$

де $U_{ст}$ – напруга в стовпі розряду, В; $l_{ст}$ – довжина позитивного стовпа, см.

Градієнт потенціалу встановлюється таким, що число пар зарядів в одиницю часу на одиницю довжини розряду за рахунок безперервної іонізації атомів ртуті в об'ємі лампи дорівнює числу рекомбінацій в об'ємі лампи і на стінках колби. Тобто градієнт потенціалу-це таке значення напруженості електричного поля, що підтримує постійну концентрацію заряджених часток. При цих умовах розряд не змінює своїх характеристик.

На рис. 4.3 і 4.4 наведені типові залежності значення градієнта потенціалу від розрядного струму для трубок різного діаметра, роду і тиску наповнюючого газу.

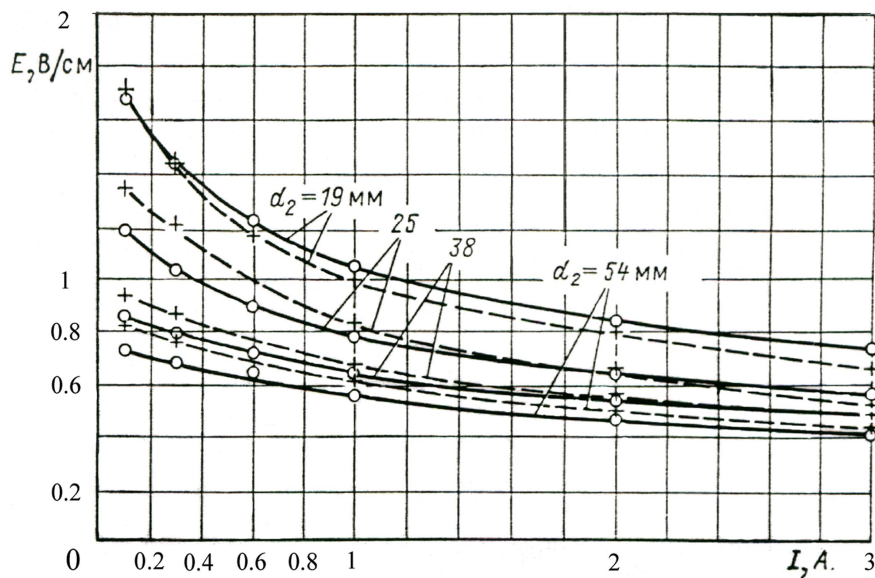


Рисунок 4.3 – Залежність градієнта потенціалу від сили розрядного струму в трубках різного діаметра при двох тисках наповнюючого газу A_T

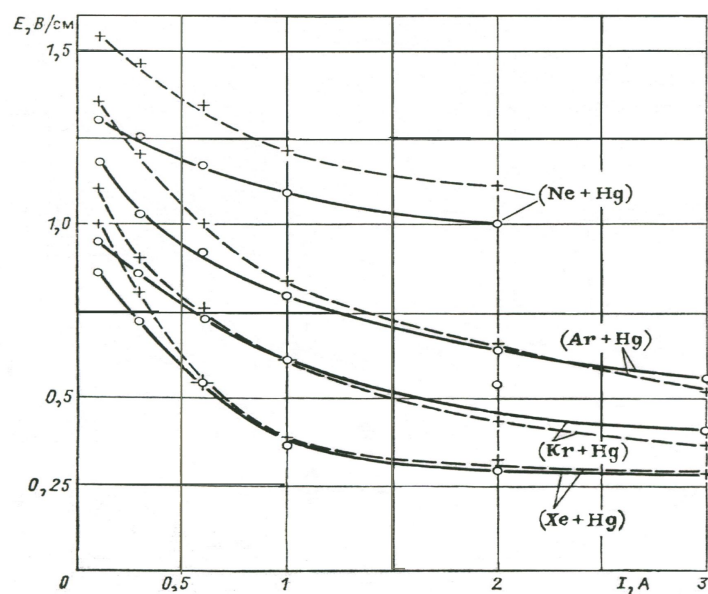


Рисунок 4.4 – Залежність градієнта потенціалу від сили розрядного струму для різних типів наповнюючого газу

З ростом струму, діаметра і молекулярної маси газу градієнт потенціалу зменшується, оскільки зростає вірогідність дифузії заряджених часток до стінки колби, що приводить до зменшення їх загальної концентрації.

Рекомендації до виконання роботи

1. Усі вимірювання треба проводити через 3 – 4 хв. Горіння лампи у досліджуваному режимі. Значення залежності напруги на лампі від сили розрядного струму занести в таблицю 4.1. Відстань між електродами дорівнює $l_{\text{ел}} = (l_{\text{л}} - 8)$, де $l_{\text{л}}$ – довжина лампи, см.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювання $U_{\text{л}} = f(I_{\text{р}})$

$I_{\text{л}}, \text{A}$					
$U_{\text{л}}, \text{В}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$l_{\text{ст1}}, \text{см}$					
$l_{\text{ст2}}, \text{см}$					
$l_{\text{ст3}}, \text{см}$					

2. За результатами таблиці 4.1 побудувати залежність $U_{\text{л}} = f(I_{\text{р}})$ при $l_{\text{ст}} = \text{const}$ і $U_{\text{л}} = f(l_{\text{ст}})$ при $I_{\text{р}} = \text{const}$ і визначити анодно-катодне падіння потенціалу ($U_{\text{АК}}$) шляхом екстраполяції прямолінійної частини залежності $U_{\text{л}} = f(l_{\text{ст}})$ до $l_{\text{ст}} = 0$. На основі визначення $U_{\text{АК}}$ для різних розрядних токів побудувати залежність $U_{\text{АК}} = f(I_{\text{р}})$ (рис. 4.5).

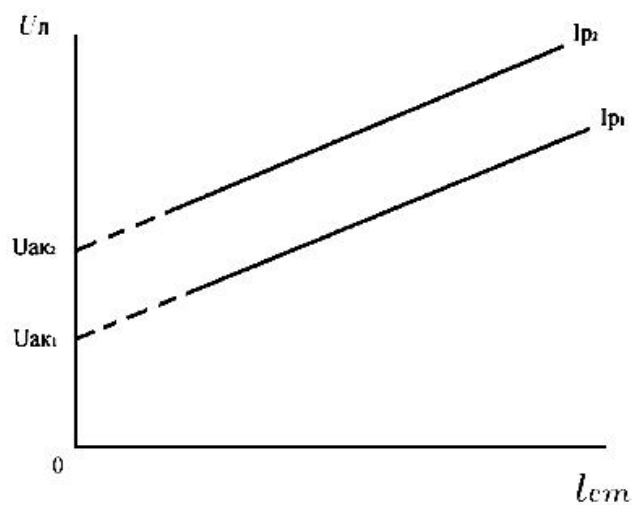


Рисунок 4.5 – Залежність $U_{\text{АК}} = f(I_{\text{р}})$

3. На основі аналізу залежностей $U_{\text{л}} = f(l_{\text{ст}})$ визначити градієнт потенціалу E за формулою (4.1) і побудувати залежність $E = f(I_{\text{р}})$.

4. Яскравість вимірюють по всій довжині лампи через 5 см в одиницях фотоструму приймача випромінювання.

Контрольні запитання

1. Які види розрядів існують в люмінесцентних лампах низького тиску? Надайте характеристику цих видів розряду.

2. Назвіть основні області дугового розряду низького тиску, охарактеризуйте їх.

3. Елементарні процеси в дуговому розряді низького тиску.

4. Роль позитивного стовпа в дуговому розряді низького тиску.

5. Градієнт потенціалу позитивного стовпа, його роль в дуговому розряді.

6. Залежність градієнта потенціалу від діаметра трубки, струму лампи, тиску і роду наповнюючого газу.

7. Яку роль відіграють біяелектродні області розряду?

8. Як визначається анодно-катодне падіння потенціалу?

9. Який тип розряду реалізується в ЛЛ, які дані, отримані у лабораторній роботі №1, це підтверджують?

10. Конструкція електродів ЛЛ.

11. Опишіть особливості роботи електрода в режимі катода і анода.

Лабораторна робота № 5

Дослідження характеристик розрядних ламп високого тиску

Мета роботи: вивчення конструкції та принципу дії розрядних ламп високого тиску (натрієвих типу ДНаТ, метало-галогенних – МГЛ і ртутних ламп типу ДРЛ), визначення їх електричних, пускових та світлових характеристик.

Опис експериментальної установки

Дослідження електричних характеристик ламп типу ДНаТ, МГЛ виконують на установці, схема якої наведена на рисунку 5.1, для ламп типу ДРЛ використовується схема на рисунку 5.2.

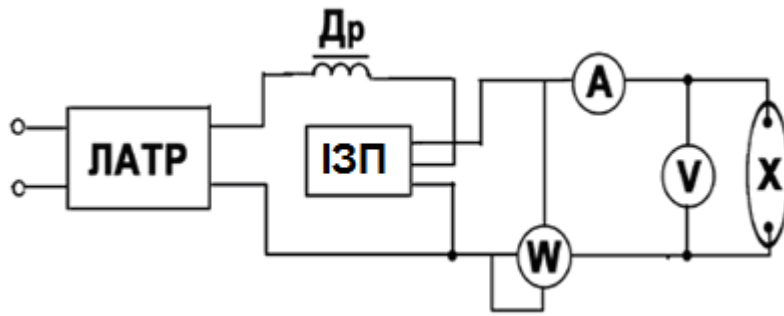


Рисунок 5.1 – Схема дослідження характеристик ламп типу МГЛ і ДНаТ:
Др – дросель; ІЗП – імпульсний запалюючий пристрій

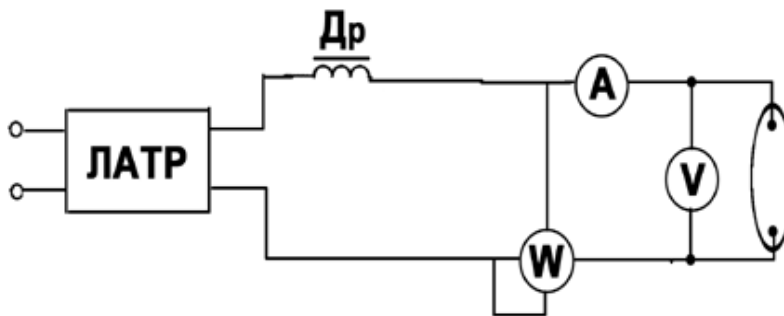


Рисунок 5.2 – Схема установки для дослідження характеристик ламп типу ДРЛ

Вимірювання світлових характеристик проводять у фотометричній кулі (див. рис. 1.1 лабораторної роботи № 1).

Завдання

1. Виміряти й побудувати залежність напруги на лампі $U_{\text{л}}$, потужності лампи $P_{\text{л}}$ і струму $I_{\text{л}}$ від часу розгоряння $t_{\text{роз}}$ при $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$. Визначити час розгоряння ламп.
2. Виміряти час повторного запалювання ламп $t_{\text{роз повт}}$.
3. Виміряти світловий потік ламп $\Phi_{\text{л}}$, визначити їх світлову віддачу при різних напругах мережі, що змінюється у межах $\pm 10 \%$ від $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$.
4. Визначити зміну $U_{\text{л}}$, $P_{\text{л}}$, $I_{\text{л}}$ при коливаннях напруги мережі у межах $\pm 10 \%$ від $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$.
5. Розрахувати коефіцієнти нестабільності вказаних характеристик при зміні напруги мережі ($\gamma_I, \gamma_U, \gamma_P, \gamma_H, \gamma_\Phi$) (див. формулу (1.3) лабораторної роботи № 1).

6. Провести порівняння відповідних характеристик для ламп різних типів.

Загальні положення

Ртутні лампи високого тиску (РВТ) мають такі переваги перед розрядними лампами низького тиску:

- високу світлову віддачу – до 60 – 100 лм/Вт;
- високий строк служби (більше 10 000 год.);
- компактну конструкцію.

Лампи типу ДРЛ

Усередину пальника в лампах ДРЛ (рисунок 5.3) вводять строго дозовану кількість ртуті та інертний газ (звичайно аргон) при тиску 20 – 50 мм рт. ст. Джерелом світла є ртутний розряд, який запалюється між двома електродами в кварцовій колбі – пальнику. Звичайно ДРЛ конструюють так, щоб уся рідка ртуть перетворювалася у пар. У цьому випадку розряд горить в насичених парах ртуті. Тиск парів ртуті в сталому режимі складає від 0,5 до 15 ат.

Випромінювання дугового розряду, який виникає у парах ртуті в пальнику, в лампах типу ДРЛ попадає на люмінофор на зовнішній колбі.

Інертний газ у пальнику сприяє зниженню напруги запалювання розряду і зменшує розпилення електродів.

З моменту запалювання розряду температура стінок пальника починає підвищуватися, відповідно зростає тиск ртутного пару. При цьому напруга на лампі і її потужність підвищуються, а струм лампи зменшується. Це викликає подальше підвищення температури колби, тиску ртутного пару, напруги горіння тощо до тих пір, поки в лампі не випариться вся ртуть. Цей час називається часом розгоряння лампи. При погасанні лампи її не можна відразу запалити через високий тиск парів ртуті.

Зовнішня колба виконує такі функції:

- зменшує тепловідведення від пальника і тим самим підвищує його температуру та світлову віддачу;
- забезпечує незалежність теплового режиму пальника від зовнішньої температури.

Змінюючи склад і тиск газу, який наповнює зовнішню колбу, можна регулювати температуру пальника. Звичайно колбу наповнюють сумішшю аргону і азоту: 85 % Ar + 15 % N₂ до тиску 100 – 250 мм рт. ст. Робоча температура поверхні пальника складає 670 – 700 °С. Цим диктується вибір матеріалу пальника – кварцове скло.

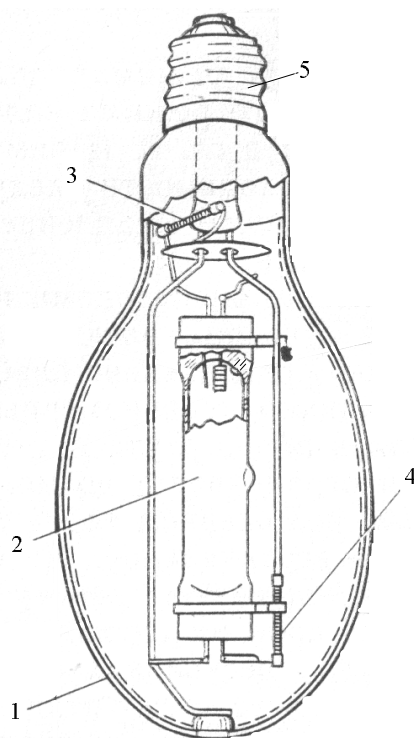


Рисунок 5.3 – Принципова конструкція ртутної лампи високого тиску:

1 – пальник; 2 – зовнішня колба; 3 – ніжка та арматура; 4 – запобіжний опір;
5 – цоколь

Електроди ламп ДРЛ визначають якість, роботоспроможність лампи, стабільність світлового потоку і строку служби. Для них використовують вольфрамові активовані катоди. Як речовину, що емітує використовують торій, суміш торію і барію.

Недоліком ртутного розряду високого тиску є відсутність випромінювання в «червоній» області спектру. Цей недолік можна усунути різними шляхами:

- за допомогою люмінофору, який випромінює в «червоній» області і тим самим підвищує «червоне відношення» лампи. Цей спосіб реалізується в лампах типу ДРЛ, в яких на внутрішню поверхню зовнішньої колби наноситься шар люмінофору;

- за допомогою додаткового випромінювання теплового джерела світла, яке знаходиться усередині зовнішньої колби. Це так звані ртутно-розжарювальні лампи (ДРН);

- завдяки домішкам у розрядний проміжок пальника елементів, випромінювання яких заповнює «прогалини» у випромінюванні ртуті і зокрема в червоній області спектру.

Металогалогенні лампи типу МГЛ

Останній спосіб реалізується в металогалогенних лампах. Використовуючи різні домішки можна створити лампи з різними спектрами випромінювання. Так, при використанні йодидів талію, натрію і індію створені лампи, за конструкцією і електричними характеристиками подібні лампам ДРЛ, але зі світловою віддачею 80 – 90 лм/Вт.

Лампи МГЛ являють собою лампи РВТ в кварцових оболонках, в які для зміни спектру випромінювання введені в незначній кількості металогалогенні сполуки. При роботі лампи зазначеного типу усередині пальника створюються умови для проходження галогенного циклу і випромінювання введених домішок.

Ртуть у цих лампах є слабо випромінюючим газом і виконує роль буферного газу, який сприяє розширенню ліній, які випромінюються домішками.

Пальники МГЛ виготовляють з кварцового скла або високотемпературної кераміки, що пропускає світло, яка може працювати при більш високих температурах, ніж кварцове скло.

Використання метало-галоїдних домішок викликає підвищення потенціалу запалювання розряду. Тому в схемах запалювання таких ламп використовується імпульсний запалюючий пристрій – ИЗУ (рис. 5.1).

Зовнішня колба лампи МГЛ не покривається люмінофором і буває вакуумною або газоповною.

Для отримання високої світлової віддачі у ламп МГЛ температура пальника має бути вищою ніж у ламп ДРЛ (750 – 770 °С). Підвищення температури пальника здійснюється завдяки зменшенню його розмірів, а також використанню зовнішньої вакуумної колби і утепленню кінців пальника нанесенням на них тонкого шару окису титану або утеплюючих металевих ковпачків.

Робочий тиск парів ртуті у цих лампах в 2рази вищий ніж у ламп ДРЛ відповідної потужності і напруги.

Натрієві лампи типу ДНаТ

Натрієві лампи високого тиску типу ДНаТ мають конструкцію, що мало відрізняється від наведеної на рис. 5.3. У пальник цієї лампи вводять амальгаму натрію і інертний газ (ксенон). Дуговий розряд високого тиску виникає в парах натрію, які в робочому стані мають тиск 13 кПа. Лампа працює в насичених парах натрію і ртуті, тому її характеристики залежать від температури. Ртуть

виконує роль буферного газу, як і у ламп МГЛ. Інертний газ має ті ж функції, що і в лампах ДРЛ.

Пальник виконують з полікристалічного окису алюмінію. Цей матеріал має високу стійкість проти негативного впливу парів натрію і може працювати при температурах 1 500 – 1 600 °С. Світлова віддача натрієвих ламп досягає 90 – 130 лм/Вт, а строк служби – 10 – 20 тисяч год.

Зовнішня колба – вакуумна для підтримки високої температури пальника.

Рекомендації до виконання роботи

1. Для виміру часу розгоряння провести заміри $U_{\text{л}}$, $P_{\text{л}}$, $I_{\text{л}}$ через кожні 10 с після пробою газорозрядного проміжку лампи до досягнення стабільності вказаних параметрів. Час розгоряння $t_{\text{роз}}$ визначається як час між моментом запалювання лампи до встановлення незмінних значень її електричних характеристик.

2. Час повторного запалювання визначається як час між моментом загасання лампи після її відключення від мережі і моментом її повторного запалювання при постійно поданій напрузі мережі.

3. Вимір світлового потоку виконують у фотометричній кулі (методика вимірювань викладена в лабораторній роботі № 1).

4. Дослідження зміни електричних і світлових характеристик ламп проводять при коливаннях напруги мережі у межах $\pm 10\%$ від $U_{\text{ном}} = 220$ В.

5. Коефіцієнти нестабільності електричних і світлових характеристик від напруги мережі ($\gamma_I, \gamma_U, \gamma_P, \gamma_H, \gamma_\Phi$) розраховують згідно з формулою (1.3).

6. Результати досліджень звести в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри ламп високого тиску

Тип лампи	$t_{\text{роз}},$ с	$t_{\text{повт}},$ с	$I_{\text{л}},$ А	$P_{\text{л}},$ Вт	$U_{\text{л}},$ В	$\Phi_{\text{л}},$ лм	$H_{\text{л}},$ лм/Вт	γ_I	γ_U	γ_P	γ_H	γ_Φ

Контрольні запитання

1. Конструкція ламп типу ДРЛ, МГЛ, ДНаТ.
2. Порівняти випромінюючі речовини в лампах типу ДРЛ, МГЛ, ДНаТ.
3. Яку роль відіграє люмінофор в лампах типу ДРЛ?
4. Яку роль відіграють метало-галогенних домішки в лампах МГЛ?
5. Яку роль відіграє інертний газ в лампах високого тиску?

6. Яке призначення має зовнішня колба ламп?
7. Вимоги до матеріалу пальника в лампах ДРЛ, МГЛ, ДНаТ.
8. Конструкція електродів ламп високого тиску і вимоги до них.
9. Які люмінофори використовують у лампах ДРЛ?
10. Як пояснити наявність часу розгоряння в лампах ДРЛ, МГЛ, ДНаТ і час повторного розгоряння?
11. Які процеси проходять в пальниках ламп ДРЛ, МГЛ, ДНаТ?
12. Які переваги ламп високого тиску порівняно з лампами низького тиску?

Лабораторна робота №6

Дослідження спектральних та колірних характеристик розрядних джерел світла

Мета роботи: отримання практичних навичок вимірювання спектральних характеристик і розрахунку координат колірності розрядних джерел світла.

Опис експериментальної установки

Основою для розрахунку координат колірності джерел випромінювання є спектральний розподіл випромінювання $\varphi(\lambda)$, який можна отримати на основі спектральних вимірів, блок-схема яких наведена на рисунку 6.1.

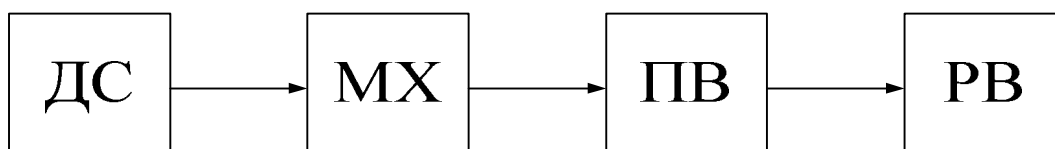


Рисунок 6.1 – Блок-схема для вимірювання спектрального розподілу випромінювання джерел світла:

ДС – джерело світла; МХ – монохроматор; ПВ – приймач випромінювання;
РП – прилад, що реєструє

Випромінювання досліджуваного ДС проектується на вхідну щілину монохроматора. Останній виділяє випромінювання вузького спектрального діапазону, яке попадає на приймач випромінювання ПВ, далі перетворюється в електричний сигнал, який реєструється гальванометром РП (i_{Φ}).

Завдання

1. Вибрати приймач випромінення й визначити відносну спектральну чутливість приймача $S_{\text{від}}(\lambda)$.
2. Визначити відносний спектральний розподіл випромінення $i_{\text{ф}} = f(\lambda)$ досліджуваного джерела світла (люмінесцентної лампи, лампи ДРЛ, лампи типу МГЛ, натрієвої лампи типу ДНаТ) за вказівкою викладача та побудувати залежності $i_{\text{ф}} = f(\lambda)$ для кожного ДС.
3. За даними п. 1 і 2 розрахувати координати кольоровості досліджуваних джерел світла.
4. Оцінити похибку вимірювань координат колірності.

Загальні положення

Усі розрядні джерела світла мають лінійчатий спектр випромінювання, на який в деяких випадках накладається випромінення люмінофору (люмінесцентні лампи низького тиску та лампи ДРЛ). Довжина хвиль ліній у спектрі випромінення визначається особливостями випромінення основної робочої речовини. Для ртутних ламп типу ДРЛ і люмінесцентних ламп (ЛЛ) такою речовиною є ртуть, тому в спектрі їх випромінення завжди присутні лінії з довжиною хвиль λ : 404,7; 433,9; 546; 577 нм. Для натрієвих ламп такими лініями є лінії, які притаманні *Na*, як робочій речовині цих ламп, λ : 568,3; 589; 615 нм. У металогалогенних лампах типу МГЛ спектр випромінення залежить від типу додатків випромінюючих речовин.

Спектральний розподіл випромінення ламп різного типу наведений на рисунках 6.2 – 6.4.

У даний час випускаються 4 – 5 основних кольорів ЛЛ: ЛД, ЛХБ, ЛТБ, ЛБ, а також лампи з поліпшеною кольоропередачею: ЛДЦ, ЛХЕЦ, ЛЕЦ, ЛТБУ.

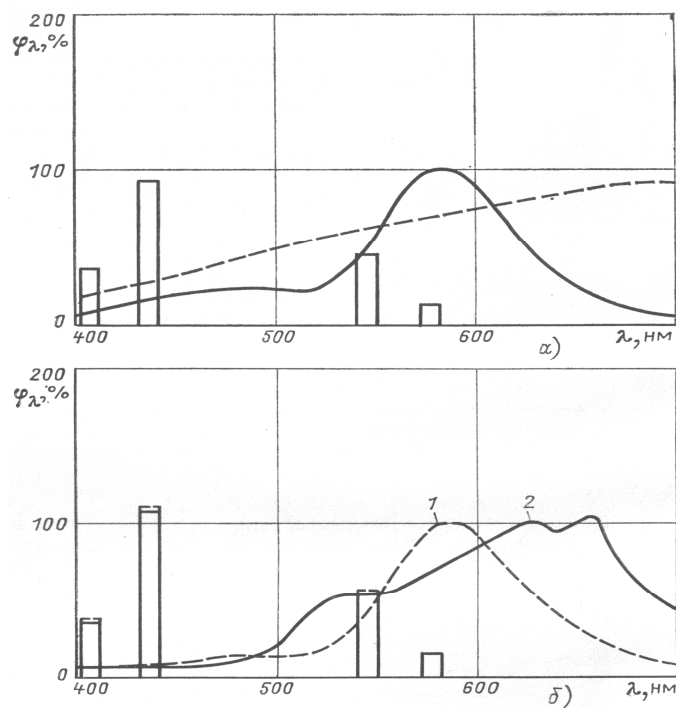


Рисунок 6.2 – Спектральні характеристики ЛЛ різної колірності:
 а – ЛБ, пунктирна крива – випромінення АЧТ при $T = 3600 \text{ K}$;
 б – ЛТБ (1) і ЛТБУ (2)

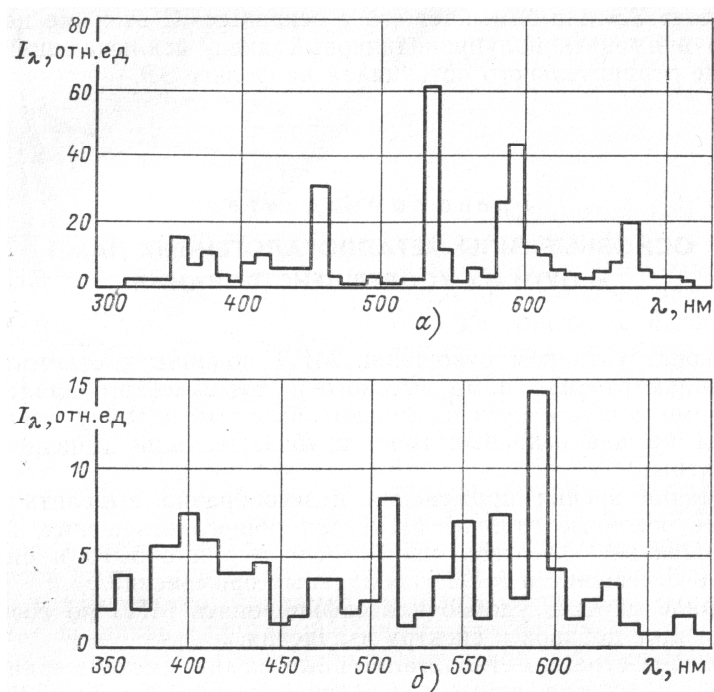


Рисунок 6.3 – Спектри випромінення МГЛ з різними додатками:
 а – йодиди Na, Tl, In; б – йодиди Na, Sc, Th

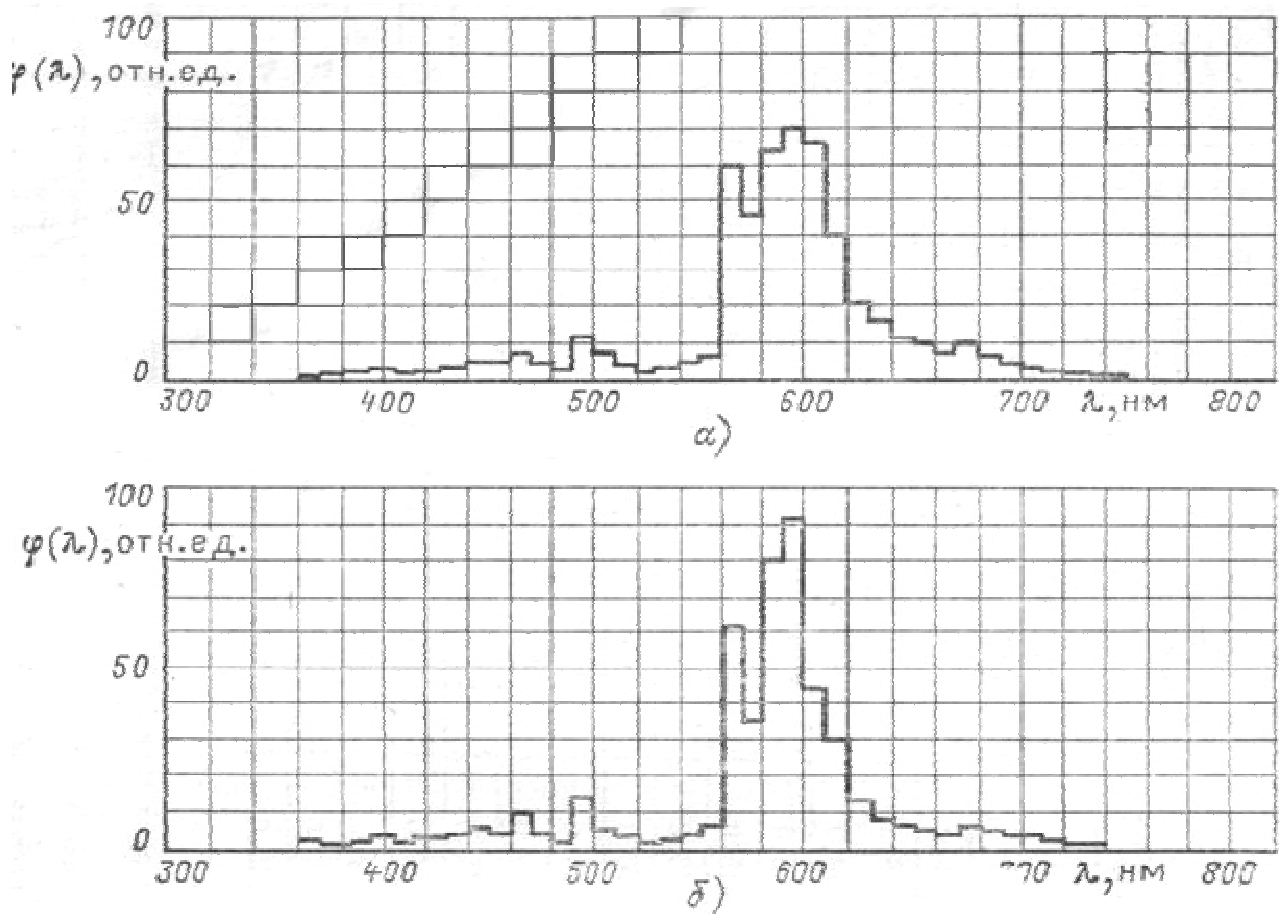


Рисунок 6.4 – Розподіл енергії випромінення в спектрі натрієвого розряду:
а – для ДНаТ-250; б – для ДНаТ-400

Колірність звичайно визначають координатами колірності на колірному графіку МКО.

Координати кольору X , Y , Z можна розрахувати на основі наступних залежностей:

$$X = \int_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda; \quad (6.1)$$

$$Y = \int_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda; \quad (6.2)$$

$$Z = \int_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda; \quad (6.3)$$

де $\bar{X}(\lambda); \bar{Y}(\lambda); \bar{Z}(\lambda)$ – питомі координати кольору, числові значення яких наведені в додатку 1; $\varphi(\lambda)$ – спектральна щільність випромінення ДС; λ – довжина хвилі випромінення, нм.

На практиці зручніше користуватися формулами:

$$X = \sum_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{X}(\lambda) \Delta\lambda \quad ; \quad (6.4)$$

$$Y = \sum_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{Y}(\lambda) \Delta\lambda \quad ; \quad (6.5)$$

$$Z = \sum_{380}^{770} \varphi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) \Delta\lambda \quad . \quad (6.6)$$

Координати колірності x, y, z розраховують із визначених координат кольору:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad ; \quad (6.7)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad ; \quad (6.8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad . \quad (6.9)$$

Рекомендації до виконання роботи

1. Виміряти відносну спектральну чутливість приймача, використовуючи джерело світла з відомим спектральним розподілом (джерело світла типу А – дані наведені в додатку А таблиця А. 2). Розрахунок ведуть із занесенням даних в таблицю 6.1.

Інтервал $\Delta\lambda$ приймають 10 нм, що забезпечує задовільну точність колірних розрахунків.

2. Результати вимірювань і розрахунків заносять в таблицю 6.2.

Таблиця 6.1 – Визначення відносної спектральної чутливості приймача

$\lambda, \text{нм}$	$\varphi_{\lambda}, \text{від.од.}$	$i_{\Phi}, \text{мкА}$	$S_{\lambda}, \frac{\text{мкА}}{\text{від.од.}}$	$S_{\lambda} \text{ від}$
380				
390				
400				
...				
770				

Таблиця 6.2 – Спектральні й колірні характеристики джерел світла

Тип джерела світла	$\lambda, \text{нм}$	$S_{\lambda},$ (з табл. 6.1)	i_{Φ}	$\frac{i_{\Phi}}{S_{\lambda} \text{ від}}$	$\frac{i_{\Phi} \bar{X}}{S_{\lambda} \text{ від}}$	$\frac{i_{\Phi} \bar{Y}}{S_{\lambda} \text{ від}}$	$\frac{i_{\Phi} \bar{Z}}{S_{\lambda} \text{ від}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
	380						
	390						
	...						
	770						

Значення питомих координат кольору $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ взяти з додатку А (табл. А.1).

Координати кольору X, Y, Z визначити як суму стовпців 6, 7, 8 таблиці 6.2:

$$X = \sum_{380}^{770} \frac{i_{\Phi} \bar{X}}{S_{\lambda} \text{ від}};$$

$$Y = \sum_{380}^{770} \frac{i_{\Phi} \bar{Y}}{S_{\lambda} \text{ від}};$$

$$Z = \sum_{380}^{770} \frac{i_{\Phi} \bar{Z}}{S_{\lambda \text{ від}}}$$

3. Координати колірності розраховуються за формулами (6.7), (6.8), (6.9), а потім порівнюються із довідковими даними і оцінюють похибку вимірювань.

Контрольні запитання

1. Особливості спектру випромінення розрядних джерел світла.
2. Чим відрізняється спектр випромінення розрядних ламп низького і високого тиску?
3. Чим визначається спектр випромінення ламп різних типів – ЛЛ, ДРЛ, МГЛ, ДНаТ? Дайте характеристику цих спектрів.
4. Які параметри характеризують спектральний склад випромінення джерела світла?
5. Як розраховують координати колірності та кольору випромінення джерела світла?
6. Поясніть схему вимірювання спектрального розподілу випромінення джерел світла.
7. Які типи люмінесцентних ламп, що відрізняються за кольором, випускаються?
8. Порівняйте отримані графіки розподілу спектральної щільності випромінення різних ДС зі спектрами випромінення аналогічних джерел світла.

Лабораторна робота № 7

Дослідження характеристик світлодіодів

Мета роботи – визначити світлотехнічні й електричні характеристики окремих світлодіодів.

Теоретична частина

Світлодіоди (СД, в іноземній літературі – LED, Lighting Emitting Diodes) – найбільш «молоді» джерела світла, що принципово відрізняються від теплових або розрядних випромінювачів.

Генерація світла в СД відбувається за рахунок енергії, що виділяється при рекомбінації носіїв струму – електронів і дірок – на межі напівпровідникових матеріалів з різним характером провідності. Характер провідності визначається не тільки самим матеріалом, але і домішками (легуючими речовинами), що вводяться в основний матеріал в дозованих кількостях. Матеріал, в якого в

результаті легування провідність визначається, в основному, надлишком електронів, називається «напівпровідником типу n ». Матеріал з недоліком електронів, тобто з надлишком позитивно заряджених іонів (так званих «дірок»), здатних поглинути електрон і стати нейтральним атомом, називається «напівпровідником типу p ». На межі таких матеріалів утвориться $p-n$ -перехід. При подачі напруги прямої полярності (мінус – до матеріалу з електронною провідністю n , плюс – з дірковою провідністю p) через перехід піде струм, а при рекомбінації електронів і дірок буде виділятися енергія. Величина енергії квантів, що виділяються при рекомбінації, залежить від різниці енергетичних рівнів електронів у збудженому і нейтральному атомах, тобто від ширини забороненої зони. При ширині забороненої зони від 1,7 еВ до 3,4 еВ енергія випромінюваних квантів відповідає видимому діапазону спектра з довжинами хвиль від 400 нм до 700 нм.

Параметри СД, як і будь-якого ДС, можна розділити на вхідні і вихідні. До вхідних параметрів відносяться:

- прямий струм через СД $I_{\text{пр}}$;
- пряме спадання напруги при номінальному струмі $U_{\text{пр}}$;
- максимально припустима зворотна напруга $U_{\text{зв. макс}}$;
- вольт-амперна характеристика (залежність прямого спадання напруги від струму).

Номінальний прямий струм $I_{\text{пр}}$ через кристал розміром $0,1 \times 0,1$ мм дорівнює 20-40 мА. Максимально припустимий прямий струм $I_{\text{пр. макс}}$ залежить від умов охолодження конструкції СД, а при імпульсному режимі – від шпаруватості імпульсів.

Пряме спадання напруги $U_{\text{пр}}$ на СД при номінальному струмі залежить від енергії випромінюваних квантів і складає від 1,5 В для діодів, що випромінюють у ІЧ-області, до 4,2 В для СД, що випромінюють синє і фіолетове світло.

Максимально припустима зворотна напруга $U_{\text{зв. макс}}$ для більшості СД дорівнює 10 В.

Приклади вольт-амперних характеристик СД різних кольорів показано на рисунку 7.1.

Усі СД допускають роботу в імпульсному режимі з перевищенням амплітудного значення прямого струму над номінальним у 5-10 разів.

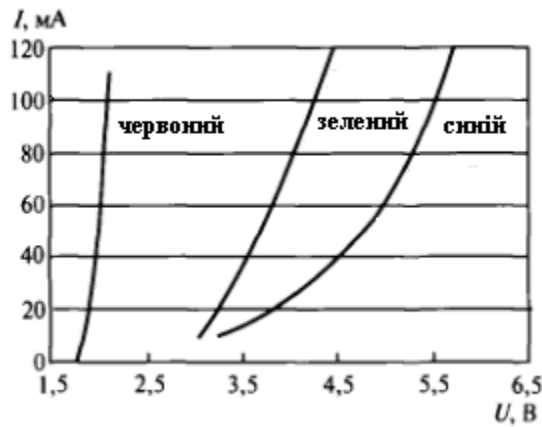


Рисунок 7.1 – Вольт-амперні характеристики СД

До вихідних параметрів СД відносяться:

- світловий потік;
- кут випромінювання $2\alpha_{0,5}$;
- вісьова сила світла I_0 ;
- колірність випромінювання або довжина хвилі в області максимуму випромінювання $\lambda_{\text{макс}}$;
- світлова віддача η_v (для ІЧ-діодів - ККД);
- яскравість L (вказується для світних пластин);
- інерційність τ ;
- люмен-амперна характеристика (залежність світлового або променистого потоку СД від прямого струму).

Світловий потік Φ – найбільш важливий для світлотехніків параметр СД, однак він указується далеко не завжди і не всіма фірмами-виготовлювачами. Частіше в каталогах приводяться осьова сила світла I і кут випромінювання $2\alpha_{0,5}$, тобто повний кут, на межах якого сила світла складає 0,5 від осьової. Для СД з двома площинами симетрії, що виготовляються рядом фірм, у каталогах указуються кути в цих площинах $2\alpha_{0,5}$ і $2\beta_{0,5}$. Серед промислових СД розкид кутів випромінювання складає від 3° до 180° , тобто КСС СД можуть бути від дуже вузьких до дифузійних. Величина осьової сили світла визначається кутом випромінювання і світловим потоком. Для однокристальних СД червоного і зеленого кольорів вона складає від 0,5 до 150 кд, для синіх – від 0,1 до 30 кд.

Колірність випромінювання визначається шириною заборонної зони і, у меншому ступені, товщиною активного шару СД. Випромінювання СД не є строго монохроматичним: ширина спектральної смуги випромінювання складає від 10 нм до 20 нм (за рівнем 0,5). Положення максимуму випромінювання слабо залежить

від прямого струму СД і від температури $p-n$ - переходу (близько 0,05 нм/К). У даний час виробляють СД практично з будь-яким кольором випромінювання.

Біле світло СД одержують або за допомогою люмінофорів, що перетворюють короткохвильове випромінювання в більш довгохвильове, або адитивним змішуванням випромінювання трьох кристалів. Найбільш простий і дешевий спосіб – уведення люмінофора, що випромінює жовте світло, до складу полімерного корпусу синіх СД. Однак передача кольору таких СД невисока (R_a не більше 70). Кращу передачу кольору при більш високій світловій віддачі можна одержати, використовуючи три кольорових люмінофори, що випромінюють червоний, зелений і синій кольори (аналогічно ЛЛ з вузько смуговими рідкісноземельними люмінофорами). Із застосуванням люмінофорів створено СД з різною колірною температурою (від 3 000 до 8 000 К) при загальному індексі кольоропередачі R_a до 85. При адитивному змішуванні випромінювань трьох кристалів можна одержати біле світло практично з будь-якою колірною температурою при R_a , близьким до 100, але з низькими частковими індексами передачі кольору.

Світлова віддача η_v лабораторних зразків червоних СД ($\lambda_{\text{макс}} = 611 \text{ нм}$) досягає $102 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$ і, за прогнозами фахівців, у найближчі роки може перевищити $150 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$. Вище $100 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$ може бути також світлова віддача зелених (530 нм) і жовтих (598 нм) СД.

Яскравість L вказується в каталогах тільки для світлодіодних матриць і пластин з досить великою площею світіння. Яскравість залежить від кольору випромінювання і може перевищувати $10\,000 \text{ кд/м}^2$.

Інерційність СД визначається часом наростання світлового потоку від 0,1 до 0,9 і спаду від 0,9 до 0,1 $\Phi_{\text{ном}}$ при подачі й знятті напруги. У сучасних СД цей час складає від 10 нс до 50 нс. Настільки мала інерційність дозволяє модулювати випромінювання СД із частотою до десятків МГц.

Типова люмен-амперна характеристика СД наведена на рисунок 7.2. На досить великих ділянках ця характеристика лінійна, однак при струмах, що значно перевищують номінальні значення, у всіх СД спостерігається відхилення від лінійності (у бік насичення).

Лінійна залежність світлового потоку від прямого струму і мала інерційність СД дозволяють створювати на їхній основі світло- і кольородинамічні установки з дуже широкими діапазонами зміни яскравості й кольору, що недосягне при використанні інших ДС.

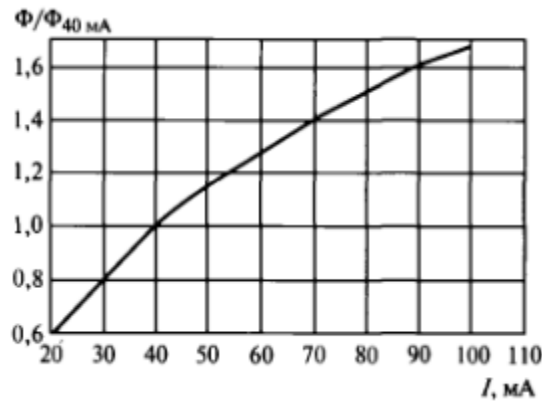


Рисунок 7.2 – Типова люмен-амперна характеристика СД

Живлення СД здійснюється в різних режимах: постійним струмом, в імпульсному режимі і функціональному режимі (наприклад, живлення струмом, сформованим по експоненті).

Режим живлення постійним струмом є найбільш простим, тому що для його здійснення не вимагаються спеціальні пристрої (генератори), СД підключаються до джерела живлення через резистор, що задає струм (рис. 7.3). Опір цього резистора визначається з виразу

$$R = \frac{(U_{\text{жив}} - U_{\text{СД}})}{I_{\text{н}}}, \quad (7.1)$$

де $U_{\text{жив}}$ – напруга джерела живлення; $U_{\text{СД}}$ – спадання напруги на СД, значення якого від 1,0 В до 2,2 В; $I_{\text{н}}$ – номінальний струм СД.

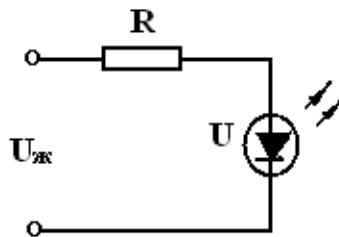


Рисунок 7.3 – Схема включення СД

Опис експериментальної установки

Вимірювання вольт-амперних і світлотехнічних характеристик світлодіодів здійснюють за допомогою приладу для вимірювання параметрів світлодіодів. Прилад містить два стояка, розміщені в ізолюваному від зовнішнього освітлення об'ємі. На одному стояку розташований фотоприймач, на другому встановлюється світлодіод. Прилад

містить клеми для підключення зовнішнього регульованого джерела живлення. Схема для вимірювання наведена на рисунку 7.4.

При вимірюванні залежності осьової сили світла від струму світлодіода величину сили світла беруть в одиницях струму фотоприймача.

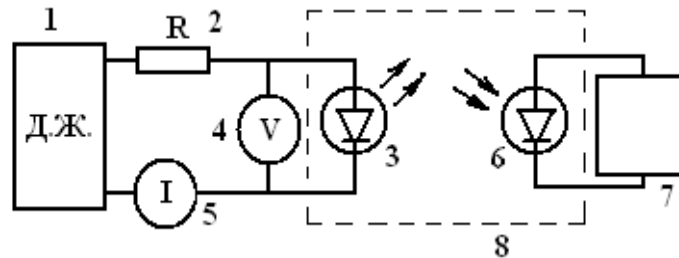


Рисунок 7.4 – Схема вимірювання параметрів СД

- 1 – регульоване джерело живлення постійного струму; 2 – резистор, що задає струм; 3 – світлодіод; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – фотоприймач; 7 – вимірювач струму фотоприймача; 8 – об'єм, ізолюваний від зовнішнього освітлення

Завдання до роботи

1. Розрахувати величину опору резистора R , що задає струм. Величину $U_{\text{жив}}$ – напруга джерела живлення; $U_{\text{СД}}$ – спадання напруги на СД (таблиця 7.1) і $I_{\text{н}}$ – номінальний струм СД для досліджуваних СД задає викладач.

2. Зібрати схему вимірювання.

3. Змінюючи напругу джерела живлення, зняти вольт-амперну характеристику (залежність струму від живильної СД напруги), а також залежність осьової сили світла (в одиницях струму фотоприймача) від струму світлодіода.

4. Побудувати в прямокутній системі координат вольт-амперні характеристики досліджуваних СД.

5. Побудувати в прямокутній системі координат графіки залежності осьової сили світла (в одиницях струму фотоприймача) від струму світлодіода для всіх досліджуваних СД.

Рекомендації до виконання роботи

1. Досліджувані світлодіоди встановлюють в затисках стояка приладу з урахуванням полярності таким чином, щоб оптична вісь СД збігалася з оптичною віссю фотоприймача.

2. Діапазон змін напруг для досліджуваних світлодіодів задається викладачем.

3. При встановленій напрузі живлення СД одночасно знімаються показання величини струму світлодіода і осьової сили світла (в одиницях струму фотоприймача).

4. Вольт-амперні характеристики для всіх досліджуваних СД будують на одному графіку.

5. Залежності осьових сил світла від струму СД для всіх досліджуваних світлодіодів будують на одному графіку.

Контрольні питання

1. Принцип роботи СД.
2. Вхідні параметри СД.
3. Вихідні параметри СД.
4. Способи отримання білого світла в СД.
5. В яких режимах здійснюється живлення СД?
6. Для чого служить і як розраховується струмозадаючий резистор?
7. Пояснити схему вимірювання.
8. Проаналізувати вольт-амперні характеристики обмірюваних СД.
9. Проаналізувати отримані залежності осьової сили світла (в одиницях струму фотоприймача) від струму світло діодів.

Таблиця 7.1 – Значення зразкових падінь напруги на світлодіодах залежно від кольору

Колірна характеристика СД	Довжина хвилі	Падіння напруги
Інфрачервоні	від 760 нм	до 1,9 В
Червоні	610–760 нм	від 1,6 до 2,03 В
Помаранчеві	590–610 нм	від 2,03 до 2,1 В
Жовті	570–590 нм	від 2,1 до 2,2 В
Зелені	500–570 нм	від 2,2 до 3,5 В
Сині	450–500 нм	від 2,5 до 3,7 В
Фіолетові	400–450 нм	від 2,8 до 4 В
Ультрафіолетові	до 400 нм	від 3,1 до 4,4 В
Білі	широкий спектр	від 3 до 3,7 В

Список рекомендованой литературы

1. Литвинов В. С. Тепловые источники оптического излучения / В. С. Литвинов, Г. Н. Рохлин. – М. : Энергия, 1975. – 246 с.
2. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.
3. Гуракова Л. Д. Конспект лекцій з курсу «Теплові джерела світла» / Л. Д. Гуракова. – Харків : ХНАГХ, 2004. – 52 с.
4. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 719 с.
5. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Ф. Е. Шуберт. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.
6. Коган И. Л. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / И. Л. Коган. – М. – Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
7. Вуглан С. М. Галогенные лампы накаливания / С. М. Вуглан, В. Ч. Волков. – М. : Энергия, 1980. – 136 с.
8. Ртутные лампы высокого давления / Под. ред. И. М. Весельницкого и Г. Н. Рохлина. – М. : Энергия, 1971. – 372 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Питомі координати кольору

$\lambda, \text{нм}$	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}	$\lambda, \text{нм}$	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}
380	0,001 4	—	0,006 5	580	0,916 3	0,870 0	0,001 7
390	0,004 2	0,000 1	0,020 1	590	1,026 3	0,757 0	0,001 1
400	0,014 3	0,000 4	0,067 9	600	1,062 0	0,631 0	0,000 8
410	0,043 5	0,001 2	0,620 7	610	1,002 6	0,503 0	0,000 6
420	0,134 4	0,004 0	0,645 6	620	0,854 4	0,381 0	0,000 2
430	0,283 9	0,011 6	1,385 6	630	0,642 4	0,265 0	0,000 1
440	0,348 3	0,023 0	1,747 1	640	0,447 9	0,175 0	—
450	0,336 2	0,038 0	1,772 1	650	0,233 6	0,107 0	—
460	0,290 8	0,060 0	1,669 2	660	0,164 9	0,061 0	—
470	0,195 4	0,091 0	1,287 6	670	0,087 4	0,032 0	—
480	0,095 6	0,139 0	1,813 0	680	0,046 8	0,017 0	—
490	0,032 0	0,208 0	0,465 2	690	0,022 7	0,008 2	—
500	0,004 9	0,323 0	0,272 0	700	0,011 4	0,004 1	—
510	0,009 3	0,503 0	0,158 2	710	0,005 8	0,002 1	—
520	0,063 3	0,710 0	0,078 2	720	0,002 9	0,001 0	—
530	0,165 5	0,862 0	0,042 3	730	0,001 4	0,000 5	—
540	0,290 4	0,954 0	0,020 3	740	0,000 7	0,000 3	—
550	0,433 4	0,995 0	0,008 7	750	0,000 3	0,000 1	—
560	0,594 5	0,987 5	0,003 9	760	0,000 2	0,000 1	—
570	0,762 1	0,952 0	0,002 1	770	0,000 1	—	—

Таблиця А.2 – Спектральний розподіл випромінювання джерела типу А

$\lambda, \text{нм}$	$\varphi_{\lambda}, \text{від.од.}$	$\lambda, \text{нм}$	$\varphi_{\lambda}, \text{від.од.}$	$\lambda, \text{нм}$	$\varphi_{\lambda}, \text{від.од.}$
380	0,032	520	0,278	660	0,634
400	0,054	540	0,329	680	0,677
420	0,081	560	0,382	700	0,720
440	0,110	580	0,440	720	0,750
460	0,143	600	0,494	740	0,800
480	0,186	620	0,541	760	0,850
500	0,228	640	0,588	770	0,880

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни

«ДЖЕРЕЛА СВІТЛА»

*(для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ГУРАКОВА** Лариса Дмитрівна,
СУВОРОВА Кристина Ігорівна
БАЛАНДАЄВА Людмила Георгіївна

Відповідальний за випуск *Ю. О. Васильєва*
За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Л. Д. Гуракова*

План 2019 , поз. 213 М

Підп. до друку 20.02.2019. Формат 60 × 84/16

Друк на різнографі. Ум. друк. арк. 2,8.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.